

УДК 629.429.3:621.313

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.122422

Оцінка якості систем керування тяговим вентиляно-індукторним приводом гібридного тепловозу

С. Г. Буряковський, М. М. Бабаєв, Б. Г. Любарський, Ар. С. Маслій, Н. П. Карпенко, Д. П. Помазан, Ан. С. Маслій, І. В. Деніс

Ідентифіковано параметри вентиляно-індукторного двигуна та створена його імітаційна модель. Синтезовано модальний регулятор швидкості та регулятор на базі нечіткої логіки. Проаналізовано роботу двох типів регуляторів на основні показники якості регулювання. За результатами аналізу встановлено, що нечіткий регулятор більш точно відпрацьовує регульовану величину

Ключові слова: тяговий вентиляно-індукторний двигун, модальний регулятор, нечіткий регулятор, гібридний маневровий тепловоз

1. Вступ

Як показує статистика, що наведена в [1], 27 % роботи на українських залізницях приходить на маневрові тепловози. Також маневрові тепловози широко застосовані на промислових підприємствах. Така робота передбачає перевезення невеликої кількості вантажу на короткі відстані (наприклад, в межах станції, підприємства), тому використання потужних локомотивів є недоцільним. На даний час більше 90 % маневрових локомотивів, що експлуатуються, вичерпали свій ресурс, а тому гостро постає проблема оновлення парку.

Аналіз ходу реконструкції засобів тяги на залізницях світу показує [2, 3], що полігон залізниць, який обслуговується тягою тепловоза, і обсяг перевезень, що виконується тепловозами на залізницях, займають провідне місце. Незважаючи на те, що в країнах Західної Європи та Америки процес впровадження прогресивних видів тяги завершений або близький до завершення (що призвело до деякого зниження випуску тепловозів в окремих країнах), потреба в тепловозах в світі буде залишатися стійкою. Крім того, ці країни будуть потребувати заміни і модернізації раніше випущених застарілих тепловозів. Все це змушує провідні зарубіжні тепловозобудівні фірми, такі як Brush Traction, Alstom, Toshiba, General Electric, інтенсивно працювати над створенням інших конструкцій тепловозів.

Результатом світової тенденції з підвищення енергоефективності є необхідність переходу на більш екологічні та надійні види маневрового тягового рухомого складу. Вони є одним із важливих виконавчих елементів станцій залізниць, що забезпечують безперебійну роботу. З урахуванням вище сказаного створення гібридних установок для маневрової тяги з перспективними системами керування є одною з актуальних науково-технічних проблем залізничного транспорту.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз [2] показує, що поряд з вдосконаленням існуючих маневрових тепловозів шляхом заміни ненадійних елементів світовими компаніями проводиться робота над створенням нових типів. У [3] розглянута тенденція розвитку більш надійних, енергоефективних та екологічних автономних локомотивів.

Як зазначається в [4], основними вимогами до маневрових локомотивів нового покоління є:

- максимальне використання енергії на створення сили тяги, мінімізація енергетичних витрат на допоміжні потреби і витрат на придбання паливно-мастильних матеріалів;
- мінімізація трудових витрат протягом життєвого циклу, включаючи витрати на обслуговування і ремонти всіх видів;
- високі екологічні та ергономічні якості, що задовольняють чинним і перспективним вітчизняним і світовим стандартам.

Як зазначено в [5] практичним рішенням у створенні локомотива, який задовольняє вимогам, зазначеним вище, є використання комбінованої (гібридної) силової установки. Така установка, що розглянута в [5] складається з блоку накопичувачів енергії, наприклад, тягової акумуляторної батареї, і дизель-генераторної установки (ДГУ) невеликої потужності. Подібне рішення також розглянуте в [6], де обґрунтована можливість скорочення витрат палива не менше ніж на 40 %, так як більша частина маневрової роботи буде здійснюватися на живленні від тягової акумуляторної батареї. Це дозволить забезпечити високу екологічну чистоту локомотива.

На даний час створено достатньо велику кількість гібридних тепловозів з асинхронним приводом, які розглянуті в роботі [6]. Разом із тим все більш широкого застосування знаходять вентиляно-індукторні привода (ВІП), що описані в [7]. Як сказано в [8], такі привода за своїми тяговими показниками не уступають двигунам постійного струму та частотнорегульованому приводу, а разом із тим мають значні переваги в конструкційному виконанні.

Параметри, а саме поточкозчеплення та індуктивність, такого електромеханічного перетворювача енергії залежать не тільки від величини струму, а й від положення ротора. Так, наприклад, індуктивність машини при розузгодженому і узодженому положенні зубців ротора та статора може відрізнитися в декілька разів [9]. Така зміна впливає на сталі часу двигуна, які є вхідними величинами при налаштуванні регуляторів. Системи керування, що застосовуються на транспорті [10], оперують фіксованими значеннями сталих часу, а тому їх застосування погіршує якість динамічних режимів ВІП. З проведеного аналізу можна зробити висновок, що нелінійний об'єкт керування, а саме вентиляно-індукторний двигун (ВІД) у поєднанні з гібридною установкою, потребує застосування нетипових систем на базі нечітких алгоритмів керування.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження динамічних режимів ВІП з регуляторами різних типів, що дає можливість обрати оптимальний з них за оцінками якості (максимум перерегулювання, час регулювання та число коливань).

Для досягнення даної мети були поставлені такі завдання:

- ідентифікація параметрів об'єкта керування та створення його імітаційної моделі;
- синтезування модального та фазі-пропорційно-інтегрально-диференціального (ФПД) регуляторів швидкості та аналіз якості їх роботи;
- створення імітаційної моделі гібридного тепловоза з вентильно-індукторним приводом та дослідження його динамічних режимів;
- створення макетного зразку та перевірка працездатності системи керування з кращими показниками якості регулятора.

4. Розробка математичної моделі тягового вентильно-індукторного приводу

Обґрунтування доцільності переходу на гібридну тягу наведено в [11]. Використання у системі накопичувачів енергії дозволяє відмовитися від систем регулювання обертів дизеля на користь систем керування тяговими двигунами. Для дослідження роботи такої системи потрібне створення математичної моделі вентильно-індукторного приводу.

За основу було вибрано ВІД марки ДВІ-165. Такий двигун має конфігурацію 8/6, його математична модель представляє собою наступну систему диференціальних рівнянь [12, 13]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left(e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \theta} \omega \right), \\ \frac{di_B}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left(e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \theta} \omega \right), \\ \frac{di_C}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left(e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \theta} \omega \right), \\ \frac{di_D}{dt} &= \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left(e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \theta} \omega \right), \\ M_{dv} &= f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta), \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_{dv} - M_s}{J}, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де i_A, i_B, i_C, i_D – струми відповідних фаз статора; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$ – потокозчеплення відповідних фаз; e_A, e_B, e_C, e_D – напруга джерел живлення; θ – кут повороту ротора; ω – кутова швидкість; M_{dv} – рушійний момент; M_s – момент опору; J – момент інерції ротора.

Для ідентифікації параметрів такого двигуна був застосований програмний комплекс FEMM, який виконує розрахунок магнітного поля методом кінцевих елементів. На рис. 1 представлена картина розподілу магнітних ліній у ВІД при ввімкненій фазі А при узгодженому та розузгодженому положенні. Отримані результати розрахунку були апроксимовані методом поліномів Чебишева. На рис. 2 представлено поверхні розподілу потокозчеплення фази та електромагнітного моменту.

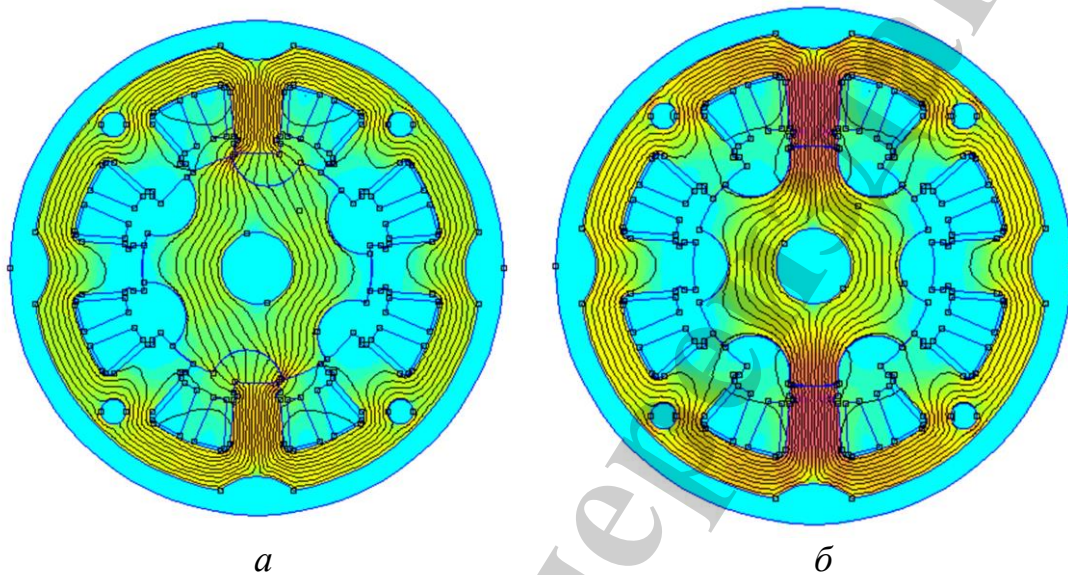


Рис. 1. Розподіл магнітних ліній у ВІД при ввімкненій фазі А: *a* – при розузгодженому положенні; *б* – при узгодженому положенні

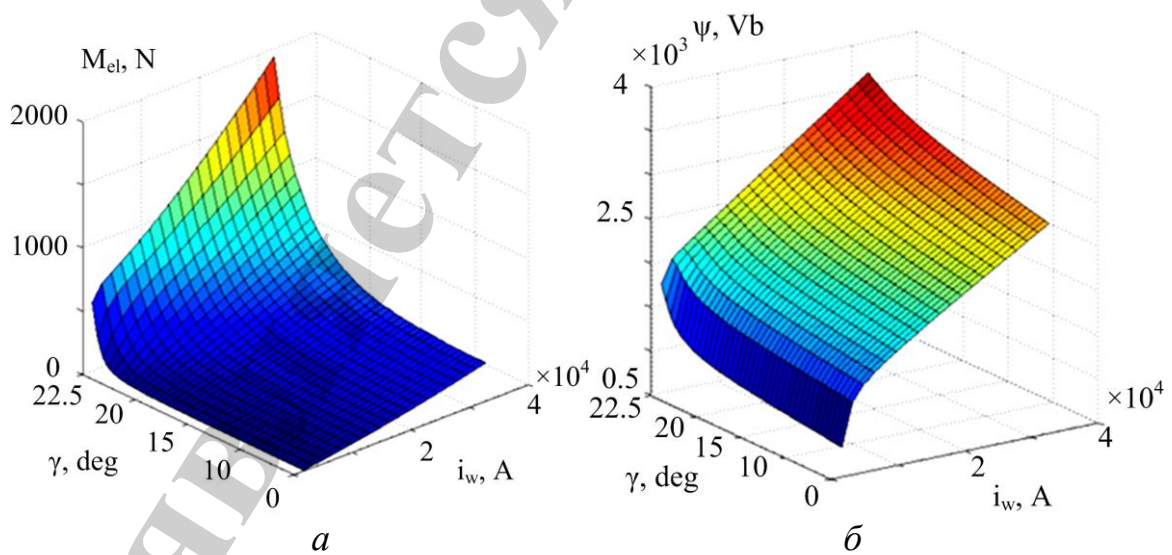


Рис. 2. Поверхні розподілу: *a* – електромагнітного моменту в залежності від кута повороту ротора та магніторушійної сили; *б* – потокозчеплення в залежності від кута повороту ротора та магніторушійної сили

Невід'ємною складовою вентиляно-індукторного приводу (ВІП) є електронний комутатор (ЕК). ЕК у ВІП необхідний для підключення фаз двигуна до джерела живлення в залежності від сигналу датчика положення ротора. Так як робота ВІД не залежить від напрямку струму в фазі, то для комутації струму в ній зазвичай застосовується півмостова (однапівперіодна) схема [14]. При цьому на кожен фазу необхідно два ключа і два зворотних діода. Таким чином, число силових елементів зростає пропорційно числу фаз. На відміну від схеми включення асинхронного двигуна, схема включення ВІД має істотну перевагу. Вона полягає у виключенні появи струмів короткого замикання при одночасному відкритті верхнього і нижнього силових ключів по вертикалі. В якості таких ключів зазвичай використовують польові або IGBT транзистори. Появи струму короткого замикання небезпечні виходом з ладу джерела живлення, а також транзисторів і пристроїв їх управління.

Використовуючи систему диференціальних рівнянь (1) була розроблена імітаційна модель електромеханічного перетворювача енергії з ЕК. На рис. 3–7 показані осцилограми прямого пуску ВІД з обмеженням струму на рівні 900 А.

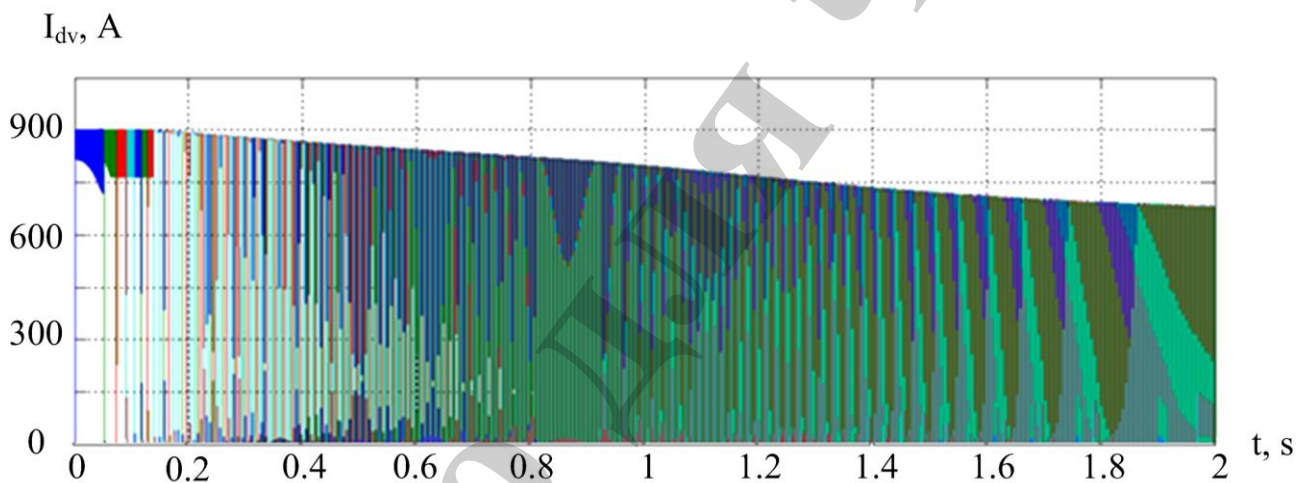


Рис. 3. Осцилограма струму двигуна при прямому пуску

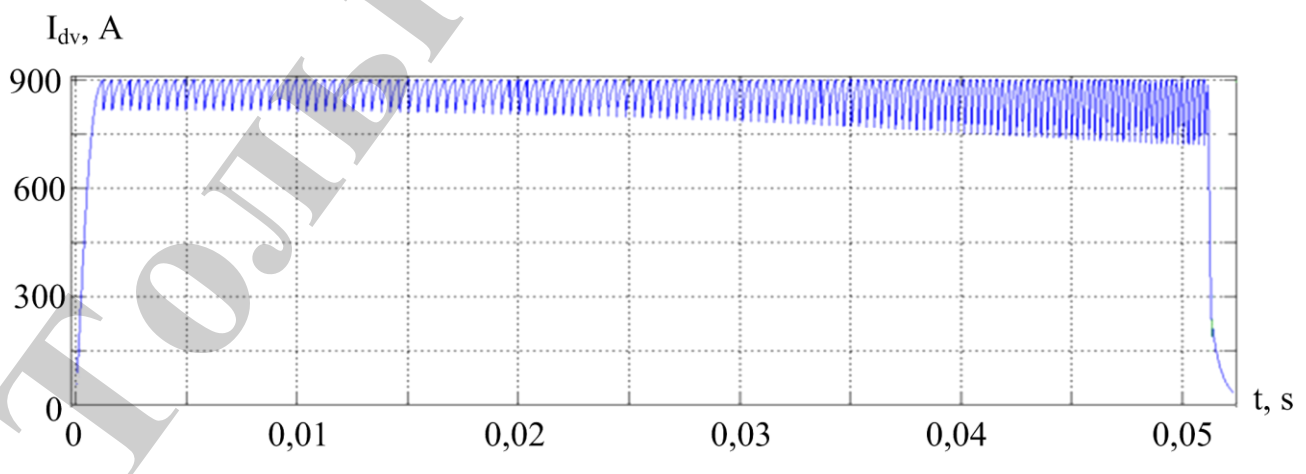


Рис. 4. Дефрагментація осцилограми струму фази А двигуна при прямому пуску

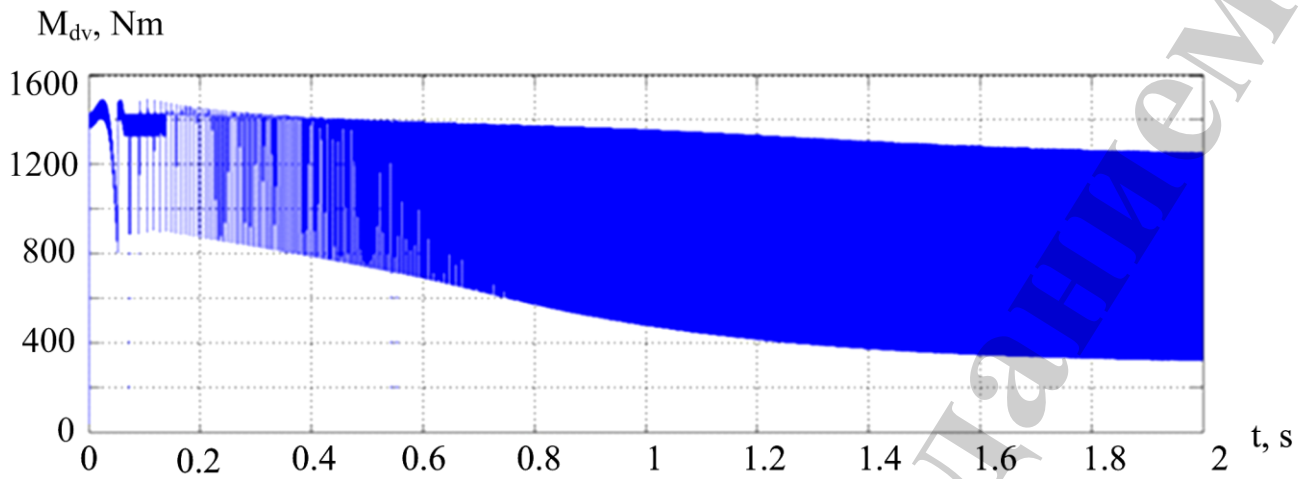


Рис. 5. Осцилограма моменту двигуна при прямому пуску

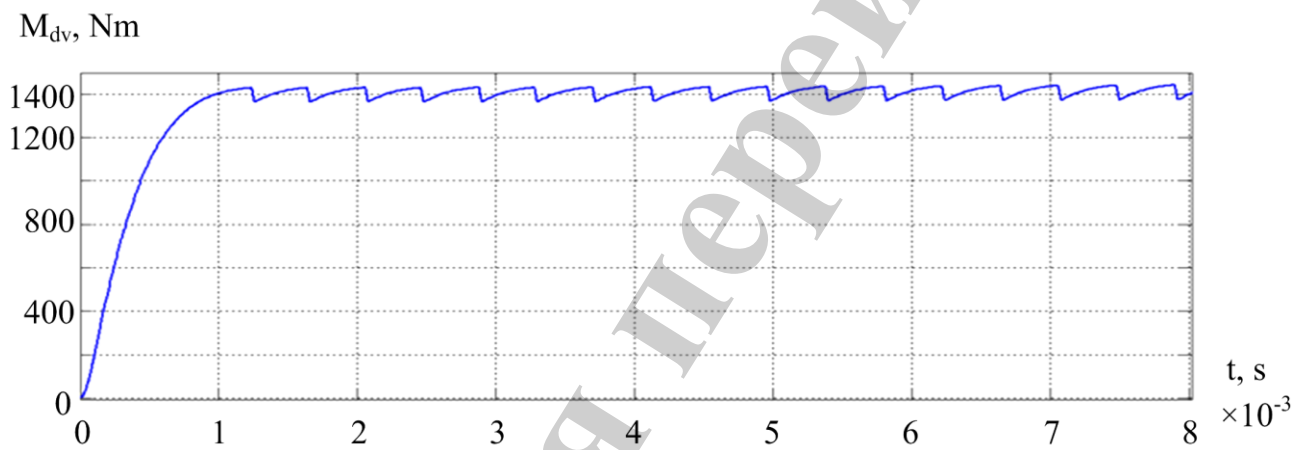


Рис. 6. Дефрагментація осцилограми моменту двигуна при прямому пуску

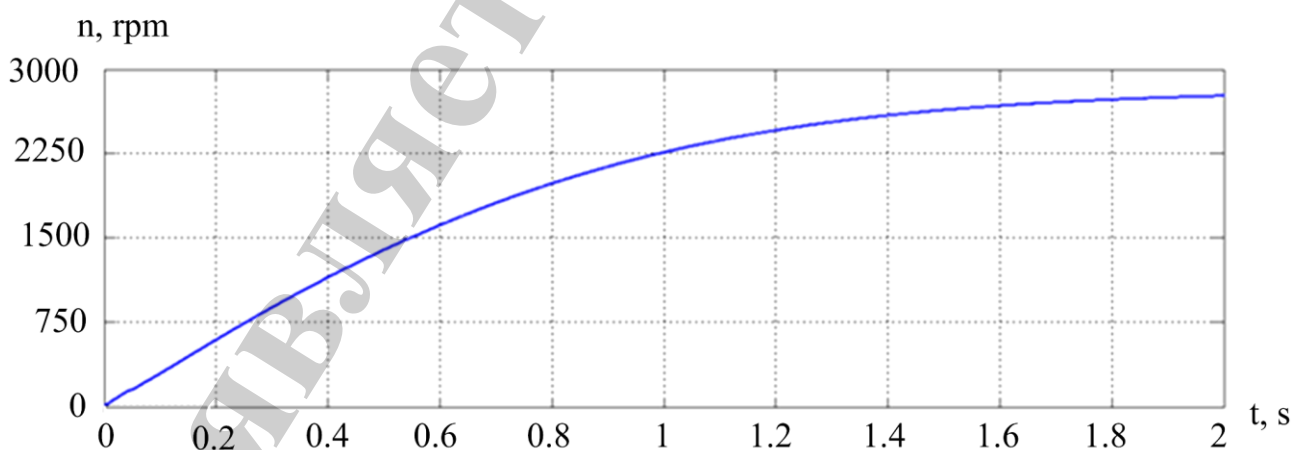


Рис. 7. Осцилограма швидкості двигуна при прямому пуску

Отримані результати моделювання прямого пуску підтверджують, що для такого типу двигуна притаманні значні пульсації моменту. При досяганні стру-

му значення 670 А на номінальній швидкості вони знаходяться в діапазоні 300–1280 Нм.

5. Синтез модального та ФПД-регулятора швидкості

Система керування ВП являє собою систему підлеглого регулювання координат з можливістю використання різних існуючих регуляторів швидкості [9, 10]. Регулятори швидкості, такі як П-, ПІ- і ПІД-, мають недостатньо високі показники якості при керуванні нелінійними і складними системами [15]. З розвитком мікропроцесорної техніки все більш широке застосування знаходять системи керування на базі модального регулятора та нечіткого керування. Тому подальші дослідження спрямовані на синтез даних типів регуляторів.

Модальний регулятор є безінерційним регулятором. Він встановлюється в ланцюгу зворотного зв'язку. На його вході здійснюється алгебраїчне складання всіх зворотних зв'язків по вектору стану. Станом системи в будь-який момент часу t_0 є така сукупність відомостей про неї, наявність яких разом з деяким керуючим впливом достатньо для прогнозування стану системи в будь-який момент часу t .

В цьому випадку, для опису системи доцільно використовувати апарат лінійної алгебри [16].

Тоді X є ні що інше, як вектор-стовпчик станів системи:

$$X = \begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \\ \dots \\ X_n(t) \end{pmatrix}; \quad (2)$$

U – вектор-стовпчик керування

$$U = \begin{pmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \\ \dots \\ U_r(t) \end{pmatrix}; \quad (3)$$

Y – вектор-стовпчик виходів системи

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \\ Y_3(t) \\ \dots \\ Y_m(t) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

У векторно-матричній формі будь-яку лінійну стаціонарну систему можна описати рівняннями:

$$X=AX+BU; \tag{6}$$

$$Y=CX+DU, \tag{7}$$

де $A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$ – квадратна матриця власних значень розмірності $n \times n$; $B = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nr} \end{bmatrix}$ – прямокутна матриця керування розмірності $n \times r$; $C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix}$ – прямокутна матриця коефіцієнтів виходу розмірності $m \times n$; $D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mr} \end{bmatrix}$ – матриця впливу керування на виході координати розмірності $m \times r$.

Система, що описується рівняннями (6), називається повністю керованою, якщо за допомогою обмеженого впливу U вона може бути переведена з довільного стану $x_0(t_0)$ у довільний кінцевий стан $x_1(t_1)$, при зміні часу $t_0 \leq t \leq t_1$. Умовою керованості є:

$$\text{Rang}P = n, \tag{8}$$

де n – порядок системи; P – матриця керованості розмірності $n \times m$.

Якщо виконується умова (8), можливе створення модального регулятора у відповідності до структурної схеми рис. 8.

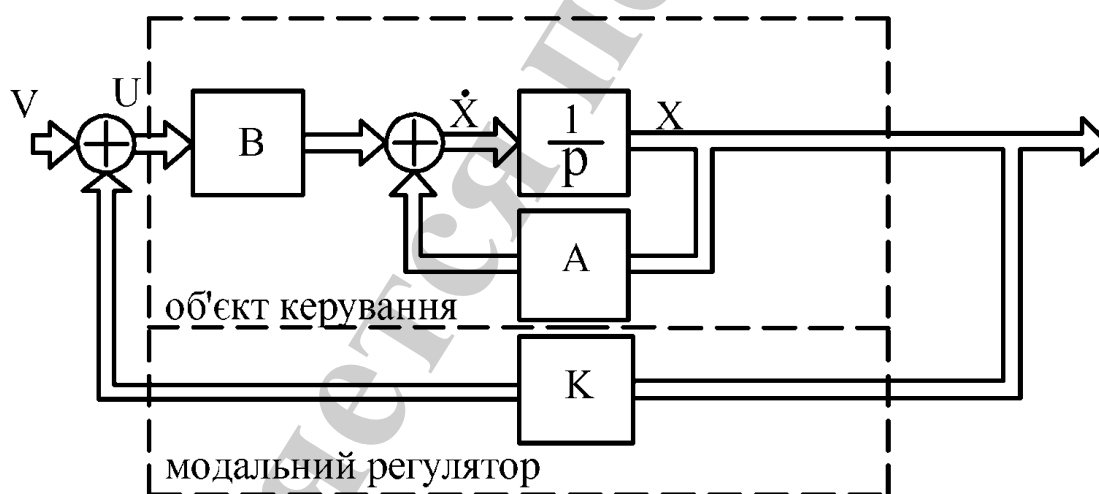


Рис. 8. Структурна схема замкненої багатомірної системи з модальним регулятором

В даному випадку замкнена система керування буде описуватись наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \dot{X}=AX+BU, \\ U=V-KX, \end{cases} \tag{9}$$

де U – матриця керування; V – матриця завдання; K – матриця-строчка зворотного зв'язку, що складається з коефіцієнтів зворотного зв'язку за вектором стану X .

На основі наведеної структурної схеми була створена імітаційна модель роботи ВІП з модальним регулятором. На рис. 9–11 представлені осцилограми струму, моменту двигуна та швидкості поїзда.

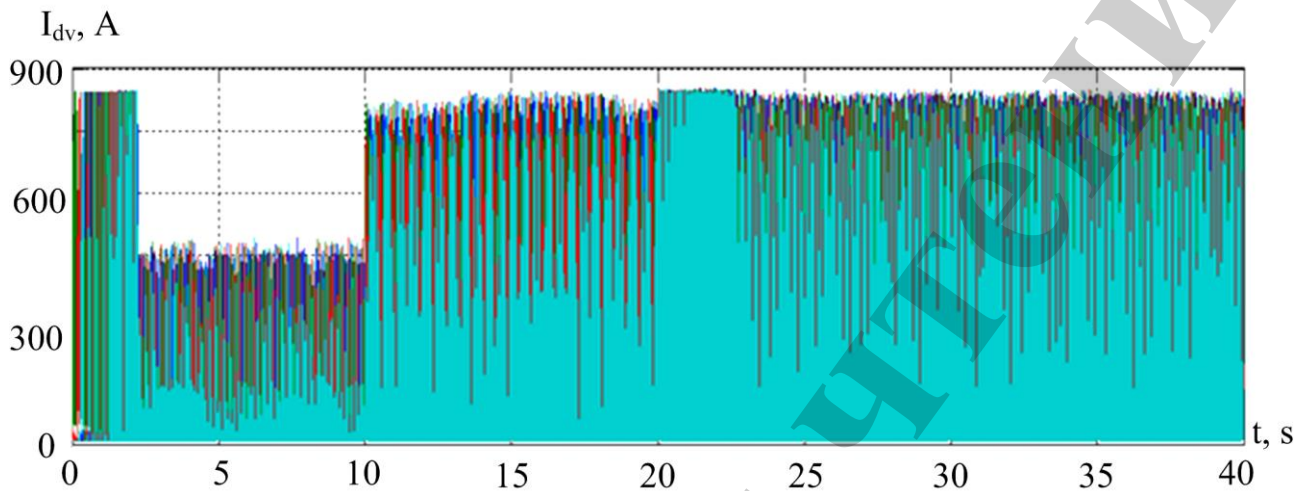


Рис. 9. Осцилограма струму двигуна при роботі ВІП з модальним регулятором

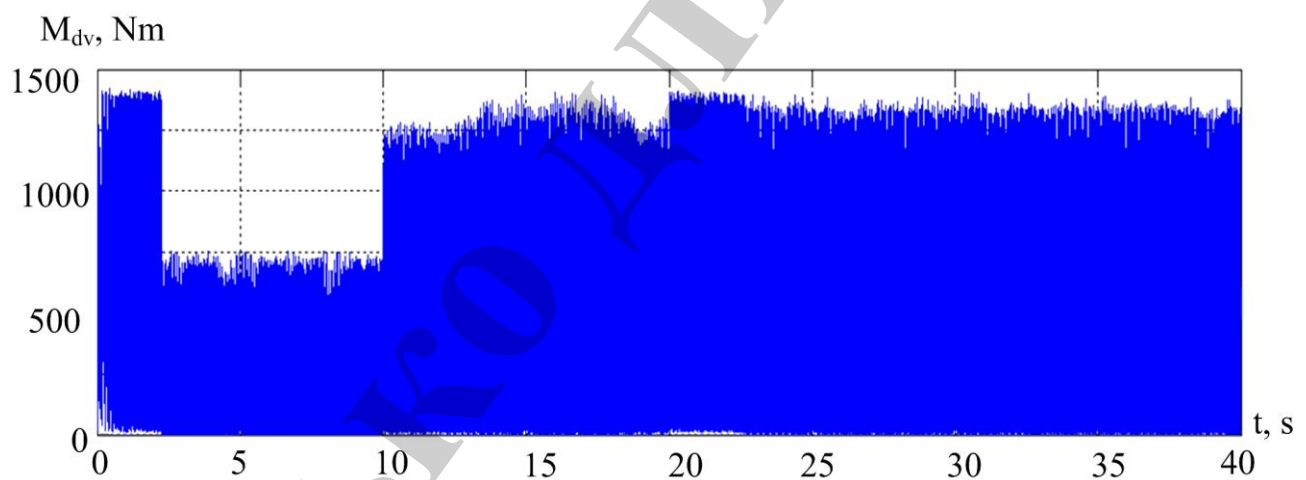


Рис. 10. Осцилограма моменту при роботі ВІП з модальним регулятором

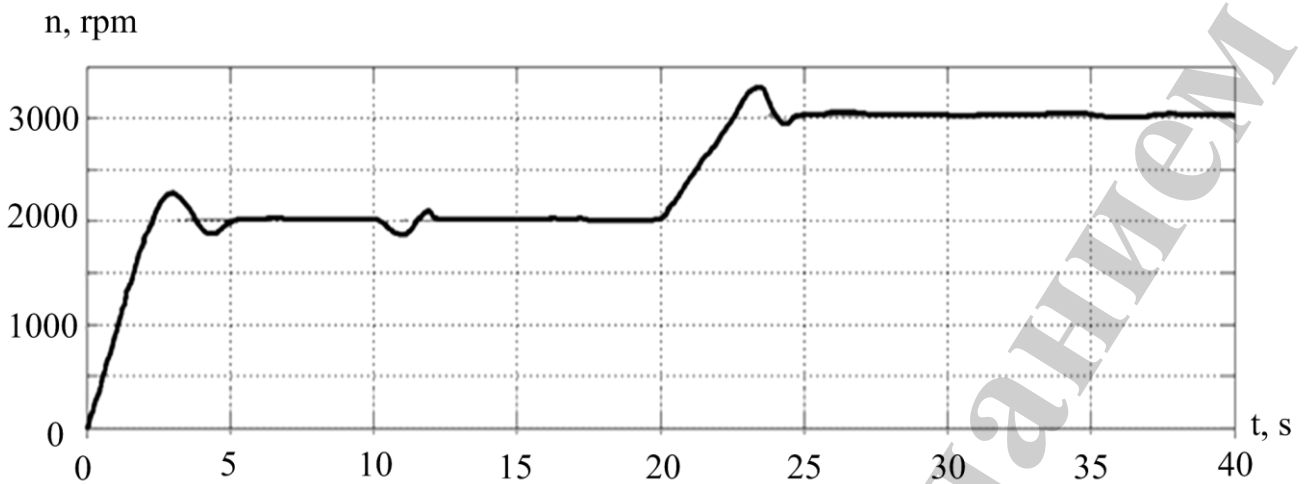


Рис. 11. Осцилограма швидкості при роботі ВІП з модальним регулятором

Обмеження швидкості двигуна здійснювалось на рівнях 2000 та 3000 об/хв. В момент часу 10 секунд до двигуна прикладувалося додаткове навантаження, що відповідає просадці по швидкості.

Характеристики регуляторів в деяких випадках можливо покращити за допомогою методів нечіткої логіки [9, 17].

В основі фази логіки лежить теорія нечітких множин, де функція приналежності елемента множини не бінарна, а може приймати будь-яке значення в діапазоні 0–1. Така логіка дає можливість будувати системи, які здатні обробляти неточну інформацію. Вони дозволяють виконувати над нечіткими множинами весь спектр логічних операцій: об'єднання, перетин, заперечення та ін. [18], як зображено на рис. 12.

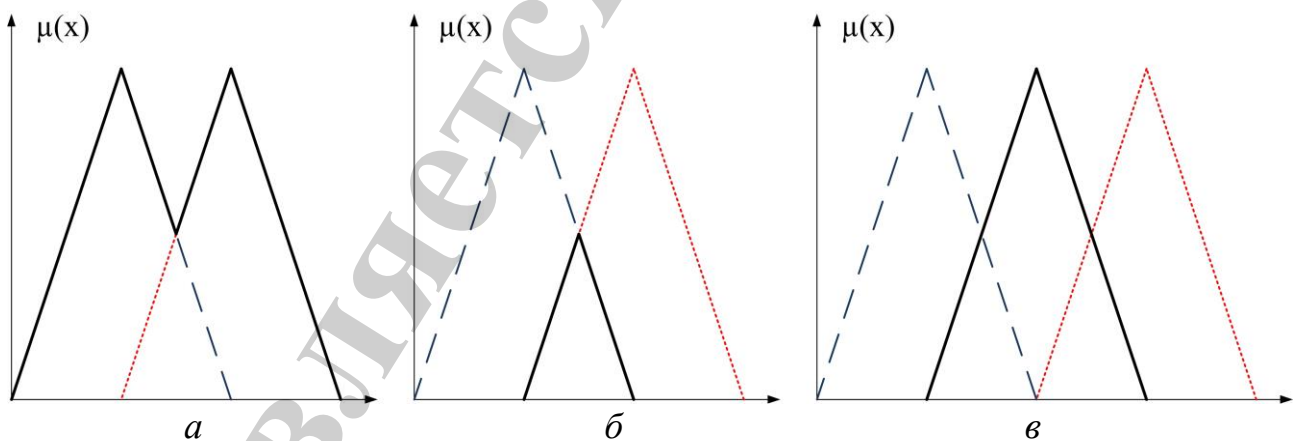


Рис.12. Основні операції з нечіткими множинами:

a – об'єднання; *б* – перетин, *в* – заперечення

Загальна структура систем с нечітким керуванням зображена на рис. 13.

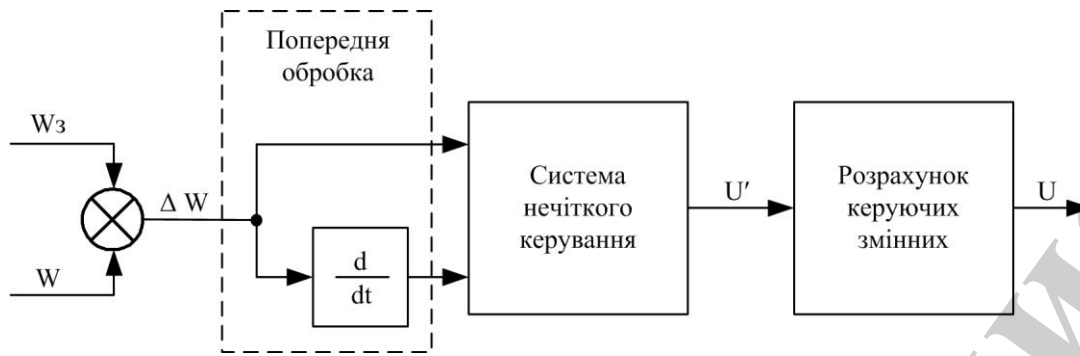


Рис. 13. Узагальнена функціональна схема нечіткого регулювання

У прикладі в якості вхідної змінної використовується різниця між заданим і реальним значеннями контрольованого параметра, в нашому випадку, швидкості обертання двигуна. Ця різниця спільно з її похідною за часом передаються у власне систему нечіткого управління як дві вхідні змінні. У той же час змінна для корекції контрольованого параметра отримується на основі вихідної змінної системи нечіткого управління, за допомогою блоку розрахунку керуючих змінних.

Для побудови фазі-регулятора була використана методика, що представлена в роботі [18]. Структура нечіткого ПІД-регулятора для ДВІ-165 представлена на рис. 14.

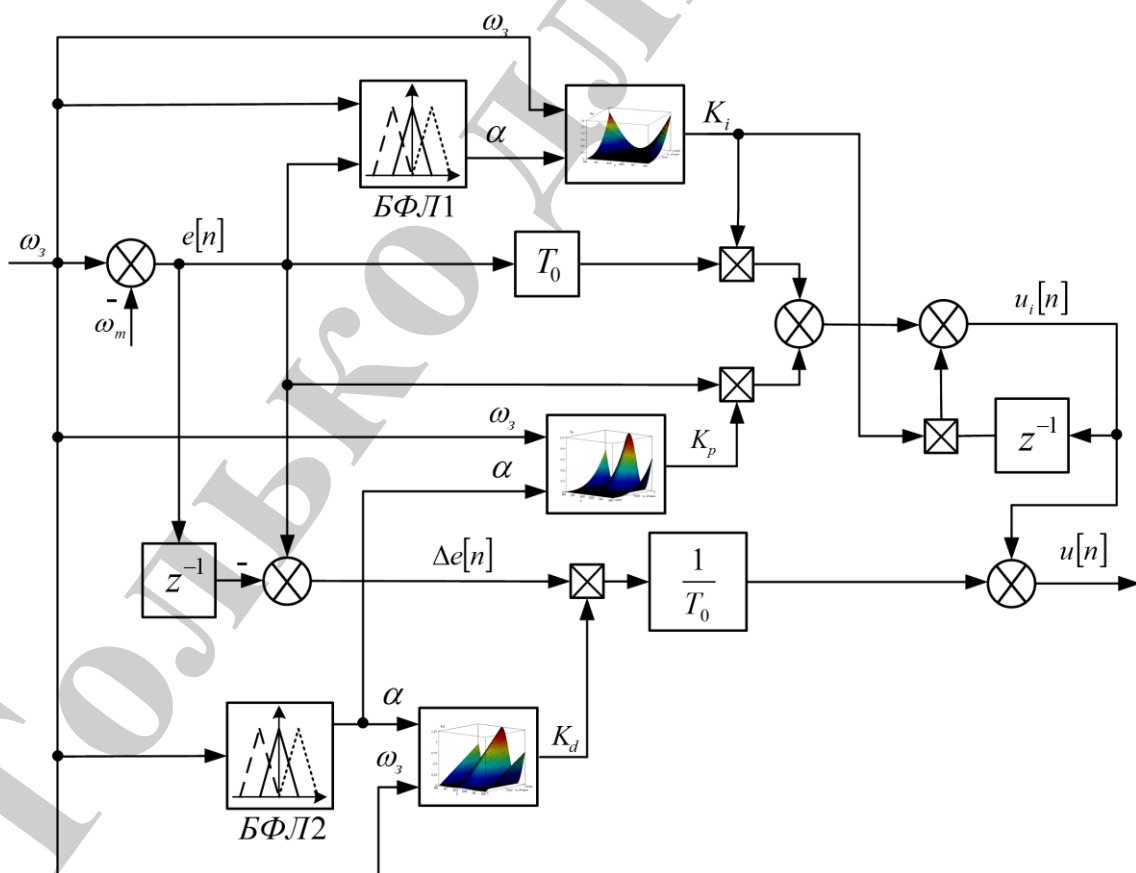


Рис. 14. Структурна схема нечіткого ПІД-регулятора

На основі наведеної структурної схеми була створена імітаційна модель роботи ВІП з модальним регулятором. На рис. 15–17 представлені осцилограми струму, моменту двигуна та швидкості.

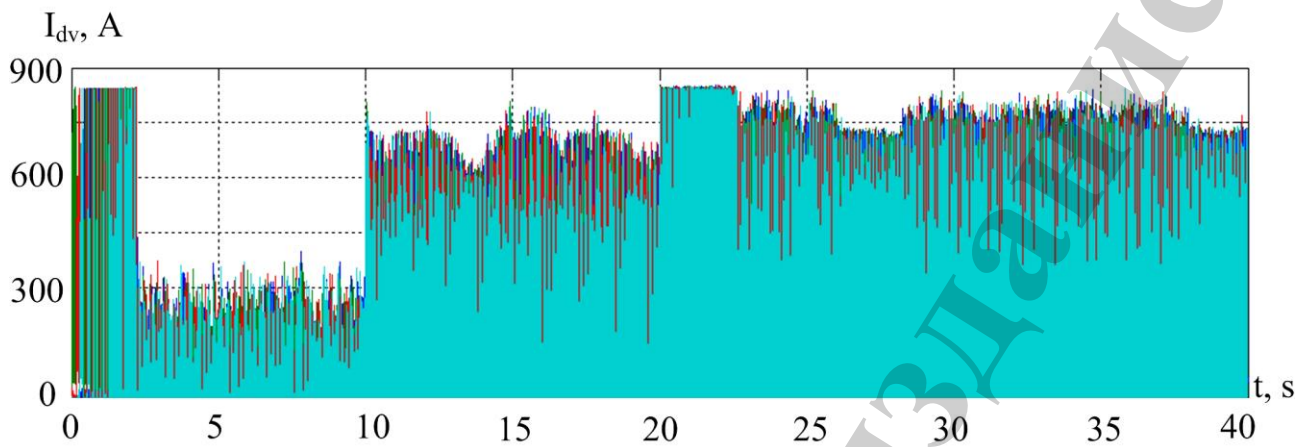


Рис. 15. Осцилограма струму двигуна при роботі ВІП з нечітким регулятором

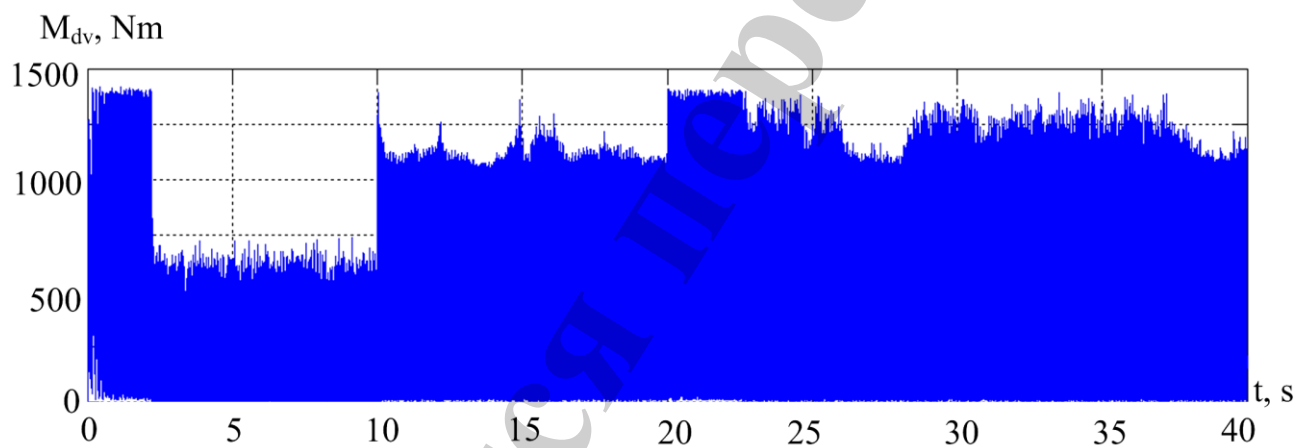


Рис. 16. Осцилограма моменту при роботі ВІП з нечітким регулятором

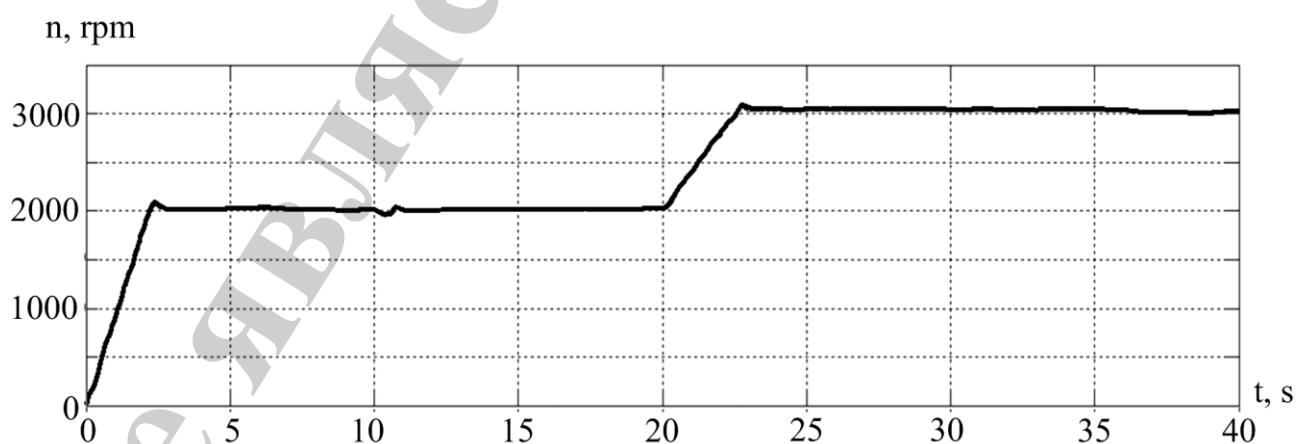


Рис. 17. Осцилограма швидкості при роботі ВІП з нечітким регулятором

Проаналізувавши осцилограми роботи приводу з модальним і ФПД-регулятором, були отримані основні показники якості роботи, які зведені в табл. 1.

Таблиця 1
Основні показники якості процесів регулювання

Показник якості	Модальний регулятор	Нечіткий регулятор
Максимум перерегулювання, σ_{\max} , %	12.27	3.75
Час регулювання, t_p , с	5.08	3.01
Число коливань, N_p	2	1

Перехідний процес по швидкості з модальним регулятором має перерегулювання, яке практично повністю відсутнє із застосуванням нечіткої логіки. Досягнуто зменшення часу регулювання до 2.07 с, що підтверджує доцільність використання такої системи керування на тяговому рухомому складі.

7. Аналіз роботи ВП гібридного тепловозу з нечітким регулятором швидкості

Принцип модернізації маневрового тепловозу більш детально розглянуто в роботі [11], де пропонується встановлення дизель-генераторної установки із синхронним генератором невеликої потужності, яка працює на зарядку акумуляторної та конденсаторної батарей. Від батарей живляться через статичні перетворювачі тягові вентильно-індукторні двигуни. Принципова схема модернізованого тепловозу наведена на рис. 18.

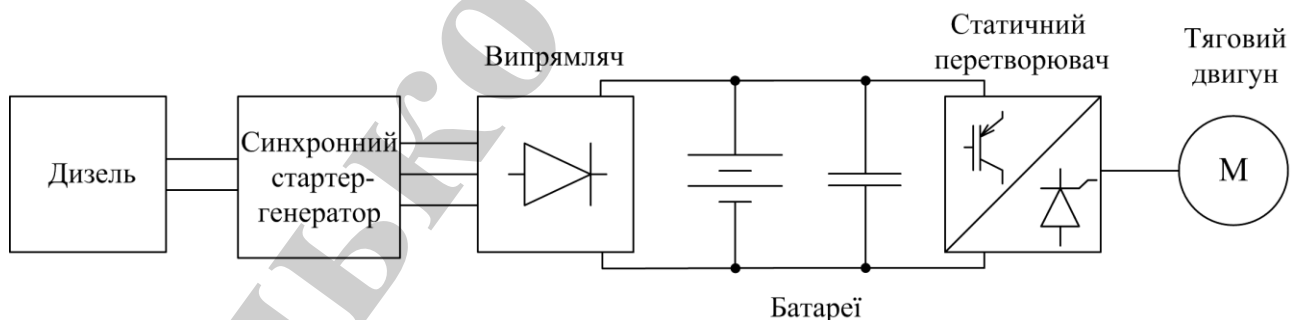


Рис. 18. Принципова схема модернізованого тепловозу

Система перетворення теплової енергії в електричну виконує роль зарядки батарей і не здійснює значного впливу на роботу тягового електроприводу. Тому створення імітаційної моделі система дизель-генератор – накопичувач енергії замінена джерелом живлення постійної напруги.

Аналіз роботи тягового електроприводу гібридного тепловозу з нечітким регулятором швидкості здійснювався на ділянці шляху Харків – Мерефа (Україна) з реальним профілем, що зображений на рис. 19, обмеженням швидкості та

масою потяга 723 тони. Обґрунтування вибору оптимального режиму проходження обраної ділянки представлено у [19, 20].

На рис. 20–22 представлені осцилограми струму, моменту тягового ВІД та швидкості руху потяга.

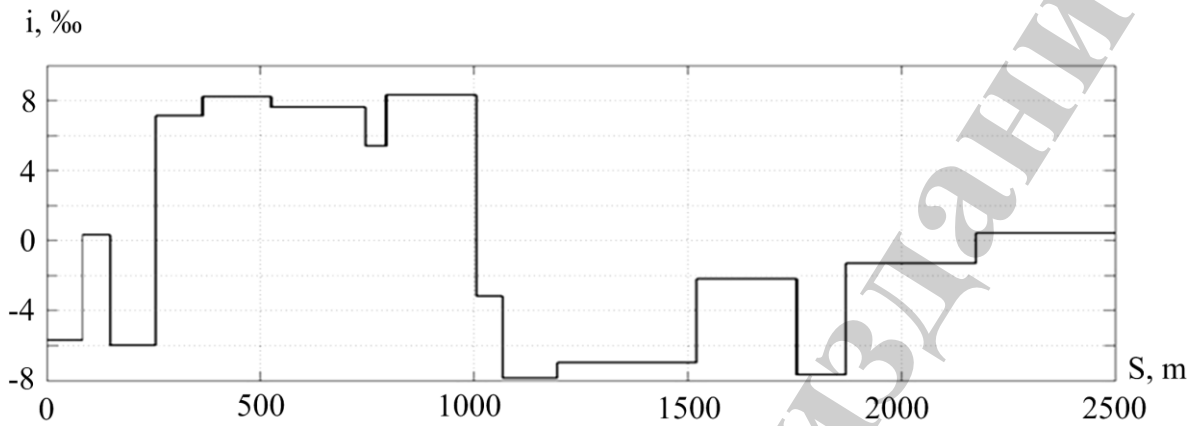


Рис. 19. Профіль ділянки Харків – Мерефа

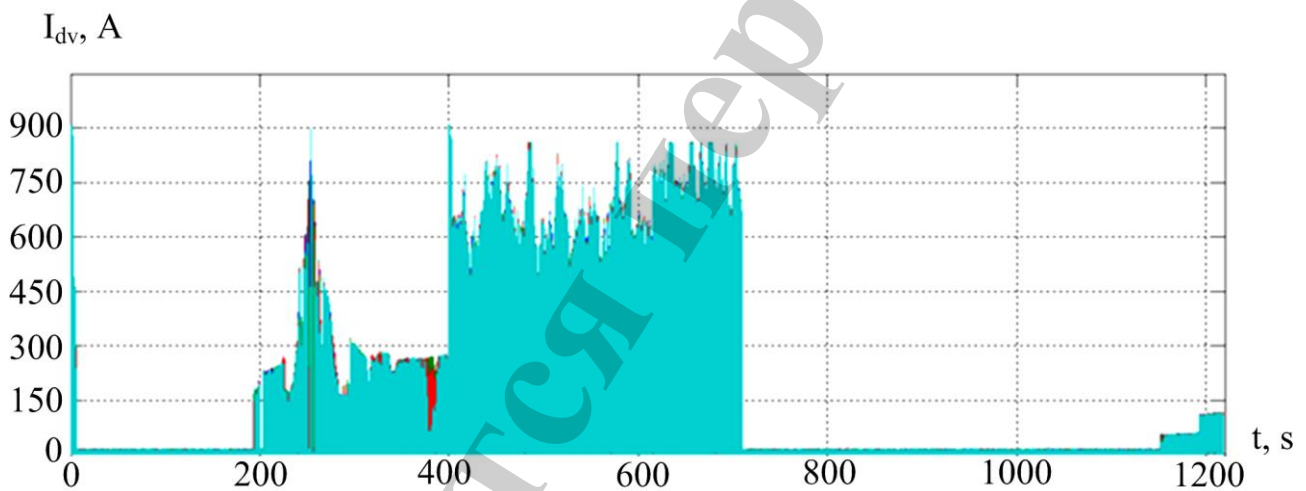


Рис. 20. Осцилограма струму тягового ВІД при русі поїзду

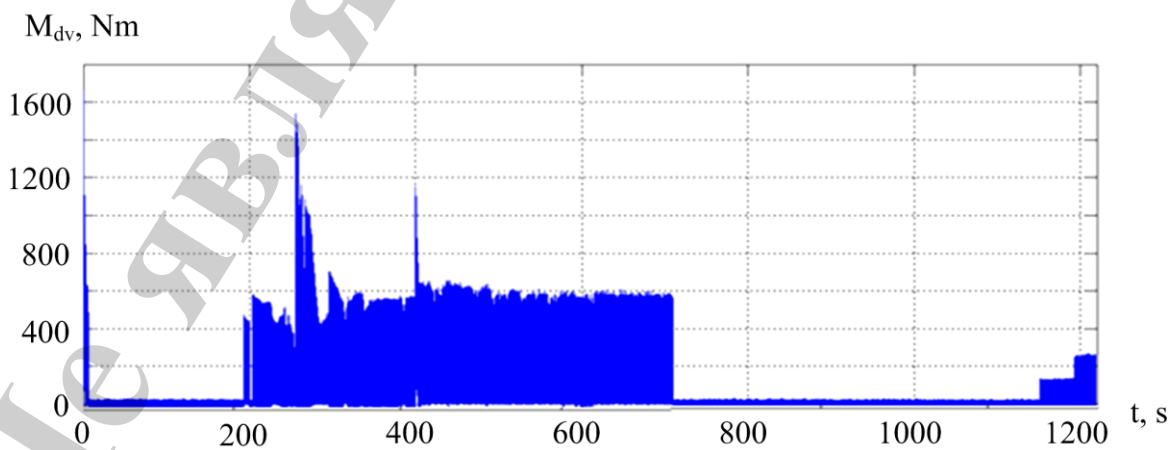


Рис. 21. Осцилограма моменту тягового ВІД при русі поїзду

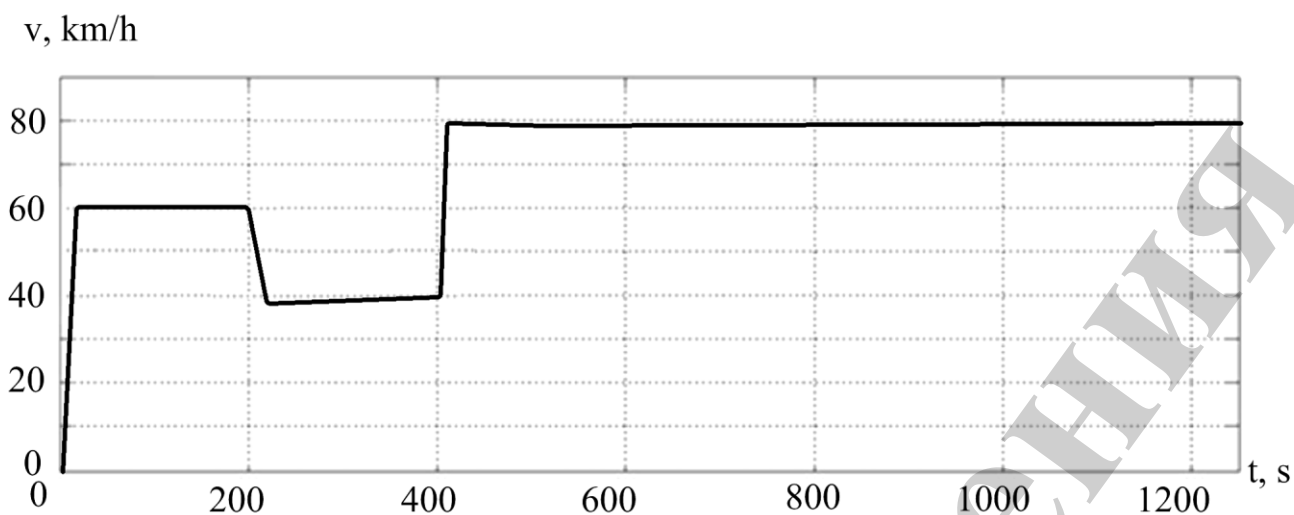


Рис. 22. Осцилограма швидкості руху поїзда

Отримані графіки підтверджують високу точність та швидкодію синтезованого ФПД-регулятора та доцільність застосування такої системи на гібридному рухомому складі.

8. Підтвердження працездатності тягового вентиляно-індукторного приводу з синтезованою системою керування

Для підтвердження працездатності ВІП з ФПД-регулятором швидкості був створений макетний зразок, зовнішній вигляд якого представлений на рис. 23.



Рис. 23. Макетний зразок ВІП з ФПД-регулятором

В даному випадку колісна пара закріплена на стійках до підставки через два опорних підшипника. На валу двигуна закріплена шестерня, а на колісній парі розміщено зубчасте колесо з кількістю зубів 16 і 51 відповідно. Передавальне число редуктора дорівнює 3.2. Двигун жорстко закріплений до підставки. Силові дроти і дроти управління між собою розділені і екрановані для захисту від наведень і перешкод. Як навантаження був використаний важіль механічного гальма. Напруга джерела живлення $U_d=100$ В при проведенні випробувань підтримувалося на постійному рівні з частотою ШІМ 20 кГц і з обмеженням струму на рівні 3 А. Для зручності роботи з макетом передбачено підключення РК дисплея, з можливістю виведення різної інформації, що особливо важливо на етапі налагодження.

Випробування ВІП проводилися з використанням системи управління на основі нечіткої логіки. Метою експериментів був аналіз роботи приводу при різних швидкостях обертання машини, стабілізації швидкості, забезпечення плавності розгону двигуна (відповідно і колісної пари), зняття осцилограм основних координат перехідного процесу. За допомогою комп'ютера виконувалося повне управління приводом: діапазон, плавність і напрямок регулювання швидкості, вибір алгоритму плавності пуску і забезпечення необхідного пускового зусилля.

Після виходу двигуна на швидкість завдання в 2000 об/хв в момент часу 13 с ступінчасто прикладалося додаткове навантаження, чому відповідає просадка швидкості, що видно з рис. 24.

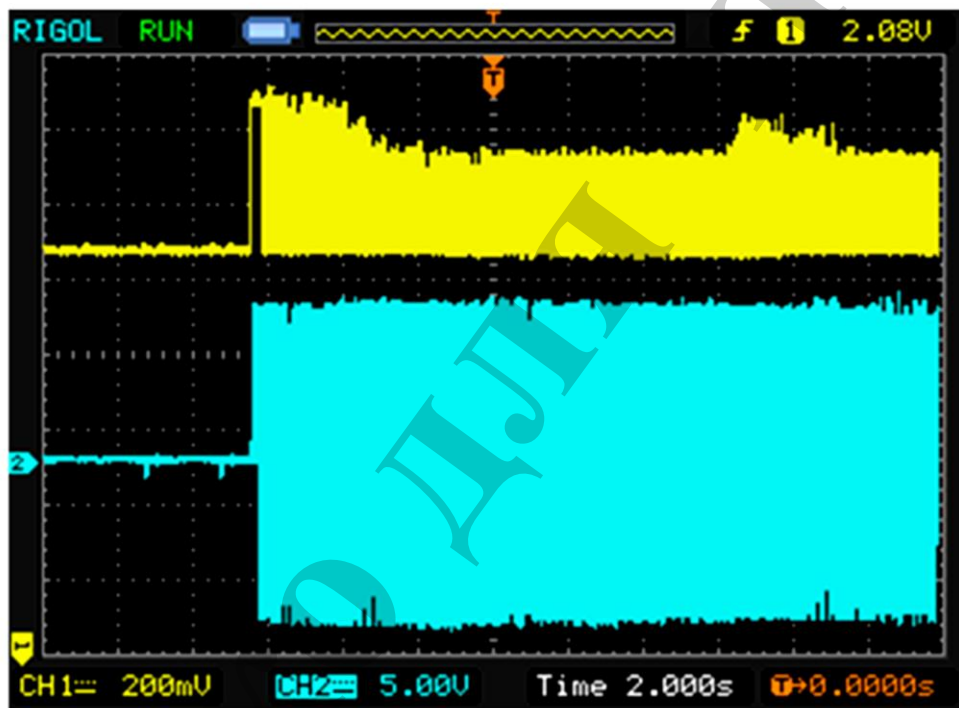
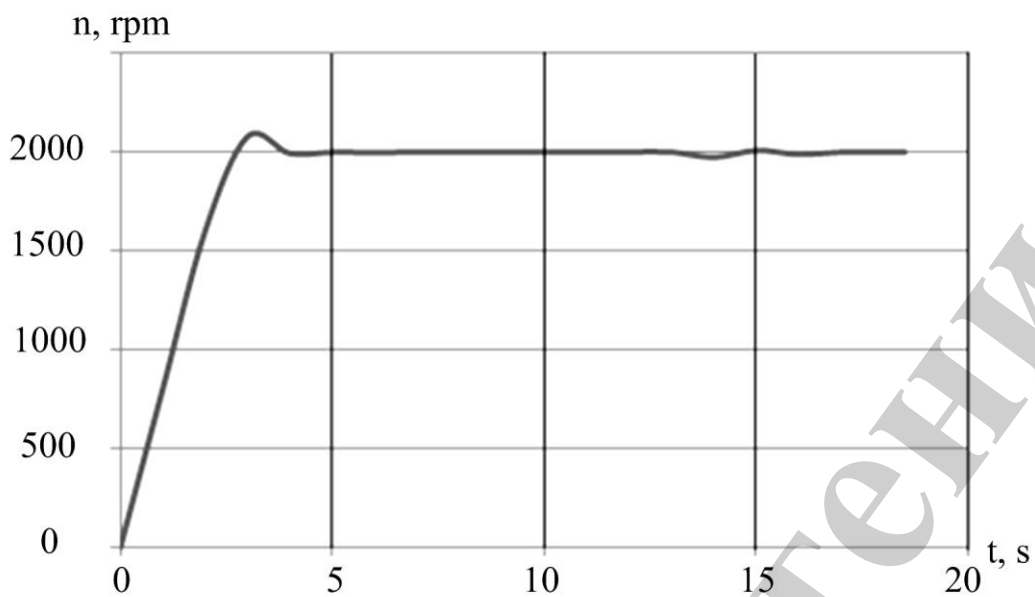


Рис. 24. Осцилограми роботи ВІП з ФПД-регулятором

В процесі роботи приводу був досліджений аварійний режим двигуна з використанням нечіткої логіки (в перетворювачі штучно задавалося відключення однієї з фаз). При цьому здійснювалася безперебійна його робота, що підтверджує адекватність методики синтезу ФПД-регулятора доказана шляхом фізичного моделювання на макетному зразку ВІП.

8. Обговорення результатів дослідження режимів роботи систем керування тяговим вентильно-індукторним приводом

Із результатів імітаційного моделювання прямого пуску ВІД видно, що при утриманні фазного струму двигуна на рівні 900 А, електромагнітний момент

досягав 1400 Нм. Також можна зробити висновок, що для такого типу двигуна притаманні значні пульсації моменту. Рекомендується створювати систему керування, яка б забезпечувала оптимальний режим роботи ЕК, як з точки зору мінімізації пульсацій моменту, так і максимізації ККД.

Розроблена імітаційна модель ВІД не дозволяє враховувати взаємний вплив суміжних фаз, що дає похибку до 7 %, але дозволяє враховувати його нелінійності. Це обумовлює створення нетипових регуляторів швидкості, а саме модального та ФПД регулятора.

Дослідження двох синтезованих систем керування дозволило встановити, що кращі показники якості регулювання швидкості має нечіткий регулятор і, як наслідок, доцільність його використання.

При дослідженні роботи гібридного тепловозу на імітаційній моделі був використаний реальний профіль шляху (рис. 14). Створена модель не дозволяє враховувати опір руху поїзда в кривих ділянках, стан колії, вплив зовнішнього середовища та ін. В подальшому урахування цих складових дозволить визначити у відсотковому співвідношенні з основним опором ступінь впливу наведених факторів на точність моделювання. Це дасть змогу стверджувати про доцільність ускладнення моделі.

При зміні навантаження не відбувається просадок швидкості (рис. 17), що підтверджує високу точність та швидкодію синтезованого ФПД-регулятора, а графіки на рис. 19 – працездатність такої системи.

Проведені дослідження, що є продовженням роботи [11], дозволяють розробити алгоритми керування тяговим приводом на основі ВІД. Це дає можливість застосовувати мікропроцесорну техніку, створювати нові засоби захисту електродвигуна, а також вибору необхідного режиму роботи як приводу, так і гібридного тепловозу. В подальшому розвитку проведених досліджень передбачається дослідження роботи систем керування не тільки в тяговому режимі, а й в режимі рекуперації.

9. Висновки

1. Ідентифіковано параметри тягового вентильно-індукторного двигуна для гібридного маневрового тепловозу у вигляді залежностей поточозчеплень фаз та їх похідних за струмами та кутом повороту ротора двигуна, а також його електромагнітного моменту. Особливістю ідентифікації є використання методу кінцевих елементів для розрахунку магнітного поля та поліномів Чебишева для апроксимації отриманих дискретних експериментальних даних.

2. Синтезовані системи керування на базі модального регулятора та нечіткої логіки. Встановлено, що модальний регулятор має наступні показники якості: максимум перерегулювання –12,27 %, час пере регулювання – 5,08 с, число коливань – 2. Для ФПД-регулятора показники якості складають: 3,75 %, 3,01 с та 1, відповідно. Таким чином, проаналізувавши якість їх роботи, встановлено, що кращі показники має ФПД-регулятор.

3. Адекватність методики синтезу ФПД-регулятора доказана шляхом фізичного моделювання на макетному зразку ВІП при штатному навантаженні та у аварійних режимах.

4. Результати досліджень показали, що створення приводів на основі ВІД дозволяє підвищити показники якості системи керування. Це дає можливість забезпечити управління процесом руху поїзду на ділянці колії з заданим профілем та графіком руху.

Література

1. Ефименко Ю. И., Ковалев В. И., Логинов С. И. Железные дороги. Общий курс: учебник / под ред. Ю. И. Ефименко. М.: УМЦ ЖДТ, 2014. 503 с.
2. Koseki T. Technical trends of railway traction in the world // The 2010 International Power Electronics Conference ECCE ASIA. 2010. doi: 10.1109/ipee.2010.5544539
3. Drofenik U., Canales F. European trends and technologies in traction // 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA). 2014. doi: 10.1109/ipee.2014.6869715
4. Integrated optimal design of a hybrid locomotive with multiobjective genetic algorithms / Akli C., Sareni B., Roboam X., Jeunesse A. // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2009. P. 151–162.
5. Hou R., Yang Y., Emadi A. Hybrid electric locomotive powertrains // 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). 2014. doi: 10.1109/itec-ap.2014.6940843
6. Kurz H. Rolling across Europe's vanishing frontiers [electric railway technology] // IEEE Spectrum. 1999. Vol. 36, Issue 2. P. 44–49. doi: 10.1109/6.744875
7. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода / Рябов Е. С., Любарский Б. Г., Оверьянова Л. В., Емельянов В. Л. // Електротехніка і електромеханіка. 2009. С. 67–72.
8. Finite element modeling and control of a high-power SRM for hybrid electric vehicle / Sezen S., Karakas E., Yilmaz K., Ayaz M. // Simulation Modelling Practice and Theory. 2016. Vol. 62. P. 49–67. doi: 10.1016/j.simpat.2016.01.006
9. Kalaivani L., Subburaj P., Willjuice Iruthayarajan M. Speed control of switched reluctance motor with torque ripple reduction using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. Vol. 53. P. 69–77. doi: 10.1016/j.ijepes.2013.04.005
10. Xin Z., Yi T. Research of hybrid electric locomotive control strategy // 2011 International Conference on System science, Engineering design and Manufacturing informatization. 2011. doi: 10.1109/icssem.2011.6081159
11. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки / Буряковський С. Г., Маслій А. С., Помазан Д. П., Деніс І. В. // Електрифікація транспорту. 2016. № 12. С. 82–86.
12. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2006. P. 324–328.
13. Miller T. J. E. Optimal design of switched reluctance motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49, Issue 1. P. 15–27. doi: 10.1109/41.982244

14. Рымша В. В. Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей: дис. ... д-ра техн. наук / Одесский национальный политехнический ун-т. О., 2004. 336 с.
15. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Теория электропривода: учеб. пос. 2-е изд. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
16. Кочнева Т. Н., Кожевников А. В., Кочнев Н. В. Синтез модального регулятора и оценка эффективности модального управления для двухмассовых электромеханических систем // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. № 4 (52). С. 15–22.
17. Вадутов О. С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Никольса. Томск: ТПУ, 2013. С. 10–15.
18. Разработка и исследование системы управления вентильно-реактивным электродвигателем / Буряковский С. Г., Любарский Б. Г., Маслий А. С., Маслий А. С. // Вестник НТУ «ХПИ». Сер.: Проблемы автоматизированного электропривода. 2013. № 36. С. 195–197.
19. Analysis of optimal operating modes of the induction traction drives for establishing a control algorithm over a semiconductor transducer / Liubarskyi B., Petrenko A., Shaida V., Maslii A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, Issue 8 (88). P. 65–72. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109179
20. Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams / Liubarskyi B., Petrenko O., Iakunin D., Dubinina O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, Issue 9. P. 59–67. doi: 10.15587/1729-4061.2017.102236